

2. Новик Ф. С., Арсов Я. Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования элементов. — М.: Машиностроение; София: Техника. — 1980. — С. 13 — 153.

3. Новик Ф. С. Математические методы планирования экспериментов в металлведении. — М.: Изд-во МИСиС, 1972. — 106 с.

4. Структура и жаростойкость диффузионных слоев сталей системы Cr-Al-Si /Л. С. Ляхович, Э. Д. Щербаков, В. Г. Борисов и др. // Новые методы упрочнения и обработки металлов. — Новосибирск: НЭТИ. 1981. — С. 107 — 116.

УДК 669.018.95

Е. С. ГОЛУБЦОВА, канд. техн. наук,
Б. А. КАЛЕДИН, канд. техн. наук (БНТУ)

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СИАЛОНОВОЙ КЕРАМИКИ

Низкая пластичность материалов на основе нитрида кремния определяет сильную зависимость их механических свойств от состояния поверхности. Получение керамических изделий сложной формы из нитридокремниевых материалов, как правило, связано с окончательной размерной и поверхностной обработкой, в процессе которой неизбежно повреждается некоторая зона материала, прилегающая к поверхности обработки. Хрупкость конструкционной керамики заставляет вести механическую обработку (в основном алмазным инструментом) в достаточно мягких режимах, но и в этом случае возникающие в поверхностном слое микротрещины заметно снижают прочность образцов. Предпринимаются попытки использовать для механической обработки лазеры. Сканируя лазерными импульсами поверхность керамики, добиваются скалывания кусочков за счет невысокой стойкости к термоудару. Достоинством метода является отсутствие необходимости в режущих инструментах, однако и здесь из-за микротрещин прочность керамики снижается на ~ 40%.

В связи с этим изучены структурные и фазовые изменения в приповерхностных слоях горячепрессованной нитридокремниевой керамики после импульсной периодической лазерной размерной обработки и их влияние на механические свойства материала [1]. Показано, что, применяя специальный высокотемпературный отжиг после лазерной обработки, можно восстановить механические свойства до начального уровня.

В данной работе изучалось также влияние пяти способов обработки (до обработки, свободная генерация, то же с последующим отжигом, модулированная добротность, то же с последующим отжигом) на микротвердость H_{μ} (ГПа), предел прочности при изгибе $\sigma_{изг}$ (МПа) и коэффициент вязкости разрушения K_{Ic} (МПа·м^{0.5}) тисинита, нитрида кремния (Si_3N_4) и сиалона. Состав и пористость этих керамик приведены в табл. 1.

Состав и пористость керамики

Материал	Состав, % (по массе)	Пористость, %
Тисинит	Si ₃ N ₄ + 5% MgO + 5% T ₁ N	6
Нитрид	Si ₃ N ₄ + 5% MgO	7
Сиалон	(Si ₃ N ₄ + 10% AlN) + 10% Al ₂ O ₃	4

Лазерную обработку, как и в [1], проводили в двух режимах: при свободной генерации (длительность лазерного импульса $4 \cdot 10^{-3}$ с) и модулированной добротности (длительность импульса $3 \cdot 10^{-7}$ с). Последний режим позволяет устранить остаточные микротрещины в материале в результате обработки расфокусированным лазерным лучом. Отжиг производили при 1400 – 1500 °С в среде азота. Тонкую структуру изучали рентгеновскими методами.

Для проведения эксперимента, в котором исследовалось влияние только качественных факторов (вид материала и обработки), был использован двухфакторный план дисперсионного анализа [2]. Каждый опыт повторялся 3 раза. Результаты измерения микротвердости H_p в проведенных опытах представлены в табл. 2. Для исключения систематических ошибок опыты проводились в случайном порядке.

Таблица 2

Схема проведения эксперимента

Вид материала G_j	Вид обработки P_i					T_i
	До обработки	Свободная генерация	То же + + отжиг	Модулированная добротность	То же + + отжиг	
	A	B	C	D	E	
Тисинит	10	8,2	10,3	7,9	10,8	152,1
	10,7	8,9	11	8,6	11,5	
	11,4	9,6	11,7	9,3	12,2	
Сиалон	12,7	11,5	12,5	12,1	12,8	195,3
	13,4	12,2	13,2	12,8	13,5	
	14,1	12,9	13,9	13,5	14,2	
Нитрид кремния	11,1	8,4	10,9	8,6	11,8	162,9
	11,8	9,1	11,6	9,3	12,5	
	12,5	9,8	12,3	10,0	13,2	
Сумма T_j	107,7	90,6	107,4	92,1	112,5	$T=510,3$

В таблице приведены результаты измерения микротвердости H_{μ} (ГПа). Модель двухфакторного эксперимента принимает вид

$$x_{ijk} = \mu + P_i + G_j + P_j G_j + \varepsilon_{k(ij)}, \quad (1)$$

где P_i соответствует виду обработки ($i = \overline{1,5}$); G_j – виду материала ($j = 1, 2, 3$); $P_i G_j$ – взаимодействию P и G ; $\varepsilon_{k(ij)}$ – случайной ошибке в ячейке (i, j); $k = 1, 2, 3$.

Обработку результатов эксперимента проводили по методике [2]. Сначала по формуле

$$\sum_i \frac{T_i}{nb} - \frac{T_{...}^2}{nab} = SS_M \quad (2)$$

нашли сумму квадратов для фактора G (материал).

Здесь T_i – суммы результатов по строкам (152,1; 195,3 и 162,9); n – число опытов в ячейке (в нашем случае $n = 3$); b – количество уровней способов обработки ($b = 5$); a – количество уровней вида материала ($a = 3$) и $T_{...}$ – общая сумма всех результатов (510,3). Таким образом, $SS_M = 67,392$.

По формуле

$$SS_{\text{обп}} = \sum_j \frac{T_{0j}^2}{na} - \frac{T_{...}^2}{nab} = SS_M \quad (3)$$

(T_{0j} – сумма результатов по столбцам (107,7; 90,6; 107,4; 92,1 и 112,5)) нашли сумму квадратов для фактора P_i (способ обработки): $SS_{\text{обп}} = 44,428$.

По формуле

$$\sum_i \sum_j \frac{T_{ij}^2}{n} - \sum_i \frac{T_i^2}{nb} - \sum_j \frac{T_{0j}^2}{na} + \frac{T_{...}^2}{nab} = SS_{PG} \quad (4)$$

(T_{ij} – суммы результатов в каждой ячейке) определили сумму квадратов для взаимодействия PG : $SS_{PG} = 8,348$.

Ошибка эксперимента $\varepsilon_{k(ij)}$ вычислялась по выражению

$$\varepsilon_{k(ij)} = \sum_i \sum_j \sum_k \frac{x_{ijk}^2}{n} - \sum_i \sum_j \frac{T_{ij}^2}{n}, \quad (5)$$

где x_{ijk} – результат в каждой ячейке.

$$\varepsilon_{k(ij)} = 14,7.$$

Кроме того, по формуле

$$SS_{\text{общ}} = \sum_i^a \sum_j^b \sum_k^n x_{ijk}^2 - \frac{T^2}{nab} \quad (6)$$

определяли общую сумму квадратов: $SS_{\text{общ}} = 134,868$.

Все результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты дисперсионного анализа

Источник изменчивости	Число степеней свободы	Сумма квадратов	Средний квадрат
Вид материала G	2	67,392	33,696
Способ обработки P	4	44,428	11,107
Взаимодействие PG	8	8,348	1,044
Ошибка или изменение внутри ячейки $\epsilon_k(\bar{j})$	30	14,7	0,49
Сумма	44	134,868	

Используя результаты табл. 3, по критерию Фишера F нашли, что $F_{2,30} = 33,696/0,49 = 68,77$ (для материалов); $F_{4,30} = 11,107/0,49 = 22,67$ (для способов обработки); $F_{8,30} = 1,044/0,49 = 2,13$.

Табличные значения $F_{кр}$ – соответственно 5,39 (для $\alpha = 0,01$) и 2,27 ($\alpha = 0,05$).

Таким образом, решающее воздействие на микротвердость оказывает материал, способ обработки влияет несколько меньше, а взаимодействие между ними несущественно. Меньшее влияние способа обработки можно объяснить тем, что для пяти способов обработки твердость изменяется примерно одинаково для каждого материала.

Построим графики по данным табл. 2. Большой интервал между кривыми, соответствующими разным типам материала, иллюстрирует значительное влияние этого фактора. Общий вид каждой кривой, проходящей под пятью точками, соответствующими способам обработки, отражает влияние этого фактора, а факт, что три кривые эквидистантны, свидетельствует о несущественном взаимодействии либо о его отсутствии.

Из рис. 1 видно, что сиалон лучше, так как его твердость выше, чем у тисинита и нитрида кремния. Для сравнения пяти способов обработки можно применить критерий Дункана для средних, соответствующих разным типам обработки [2]:

Способ обработки	A	B	C	D	E
x_j	107,7/9	90,6/9	107,4/9	92,1/9	112,5/9
	11,97	10,07	11,93	10,23	12,5

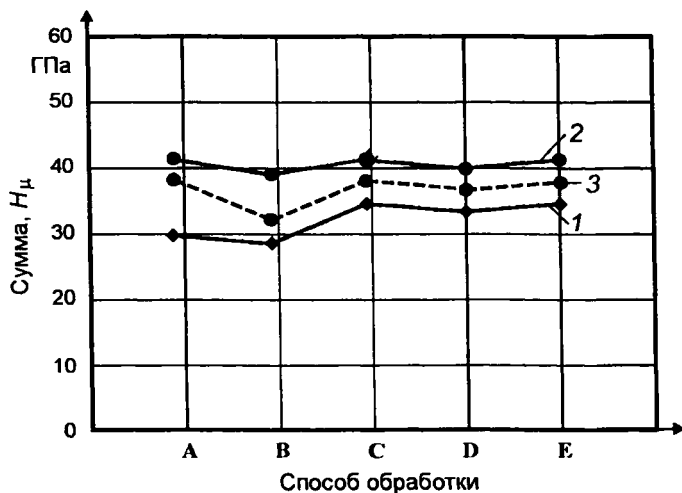


Рис. 1. Диаграмма для эксперимента по изучению вида материала и обработки:
1 – титанит; 2 – сиалон; 3 – нитрид кремния

Используя метод, изложенный в § 3.3 [2], получаем:

Способ обработки	B	D	C	A	E
Средние значения	10,07	10,23	11,93	11,97	12,5

Среднеквадратичные ошибки $x_j = 0,49$ (с 30 степенями свободы).

Нормированная ошибка для $x_j \sqrt{0,49/15} = 0,18$.

Табулированные ранги Z_p с 30 степенями свободы ($\alpha = 0,05$) (см. табл. D приложения [2]) имеют значения:

$$Z_{3,30(0,05)} = 3,04; \quad R_{3,30} = 3,04 \cdot 0,18 = 0,55;$$

$$Z_{5,30(0,05)} = 3,2004; \quad R_{5,30} = 3,20 \cdot 0,18 = 0,576.$$

Проверка разности средних, соответствующих способам обработки:

$$E - B = 12,5 - 10,7 = 2,43; \quad > 0,576;$$

$$E - D = 12,5 - 10,23 = 2,27; \quad > 0,55;$$

$$\begin{aligned}
 E - C &= 12,5 - 11,93 = 0,57; > 0,55; \\
 E - A &= 12,5 - 11,97 = 0,53; < 0,55; \\
 A - B &= 11,97 - 10,07 = 1,9; > 0,55; \\
 A - D &= 11,92 - 10,23 = 1,74; > 0,55; \\
 A - C &= 11,97 - 11,93 = 0,04; < 0,55; \\
 C - B &= 11,93 - 10,07 = 1,86; > 0,55; \\
 C - D &= 11,93 - 10,23 = 1,7; > 0,55; \\
 D - B &= 10,23 - 10,07 = 0,16; < 0,55.
 \end{aligned}$$

Таким образом, способ обработки *E* (модулированная добротность с последующим отжигом) при 5 %-ном уровне значимости отличается от *B*, *D* и *C*, тогда как между *E* и *A* значимого различия нет. Исходное состояние материалов *A* значительно отличается от *B* и *D*, а между *A* и *C* различия нет. В свою очередь *C* существенно отличается от *B* и *D*, а между *B* и *D* различия нет.

Следовательно, наилучшей комбинацией вида материала и способа обработки, дающей максимальную твердость $H_{\mu} = 13,5$ ГПа, будет сочетание силлона с лазерной обработкой (модулированная добротность) и последующим отжигом (вариант *E* + *G*₂).

Результаты испытаний на прочность при изгибе $\sigma_{изг}$ тех же материалов и способов обработки приведены в табл. 4.

Таблица 4

Предел прочности на изгиб, МПа

Вид материала <i>G</i>	Способ обработки <i>P</i>				
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
Тисинит	423	261	297	279	297
	470	290	330	310	330
	517	319	363	341	363
Силлон	420	320	350	380	410
	390	295	325	350	440
	450	345	375	410	470
Нитрид кремния	340	190	220	270	400
	370	171	200	295	430
	400	209	240	245	460

Для упрощения расчетов сумм квадратов вычтем из каждого результата 340 (среднее значение всех результатов) и разделим получившиеся числа на 10. Эти данные приведены в табл. 5.

Результаты дисперсионного анализа
по изучению предела прочности

Источник изменчивости	Число степеней свободы	Сумма квадратов	Средняя сумма квадратов
Вид материала G	2	535,6	267,8
Способ обработки P	4	1528,8	382,2
Взаимодействие PG	8	572,4	71,55
Ошибка или изменения внутри ячейки	30	323,5	10,78
Сумма	44	2960,3	

Используя результаты табл. 5, нашли, что $F_{2,30} = 267,8/10,78 = 24,84$; $F_{4,30} = 382,2/10,78 = 35,45$ и $F_{8,30} = 71,55/10,78 = 3,17$, что больше табличных значений $F_{кр} = 5,39$, $F_{кр} = 4,02$ и $F_{кр} = 3,17$ (при $\alpha = 0,01$).

Большое влияние оказывает способ обработки P , а также вид материала G ; существенно и влияние взаимодействия PG .

Интервал между кривыми, соответствующими разным видам материала G , показывает значительное влияние этого фактора. Общий вид каждой кривой, проходящей над пятью точками, соответствующими способам обработки, отражает влияние этого фактора P . Пересечение кривых 1 и 2 (рис. 2) свидетельствует о значимости взаимодействия PG .

Очевидно, что и в этом случае силон обладает некоторым преимуществом перед тиснитом и нитридом кремния.

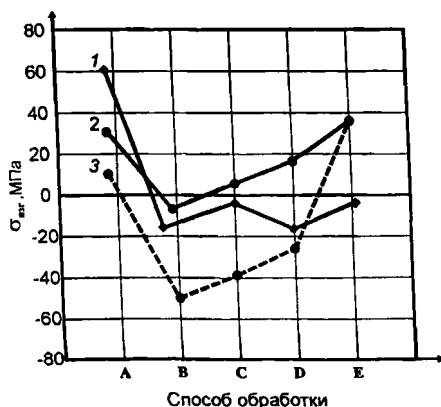


Рис. 2. Диаграмма для эксперимента по изучению вида материала и способа лазерной обработки на предел прочности при изгибе:
1 – тиснит; 2 – силон; 3 – нитрид кремния

Для сравнения пяти способов обработки также используем критерий Дункана для кодированных средних, соответствующих разным способам обработки:

Способ обработки	A	B	C	D	E
x_j	8	-7,33	-4	-2	5,67

Отсюда

Способ обработки	B	C	D	E	A
Средние значения	-7,33	-4	-2	5,67	8

Средний квадрат ошибки $x_j = 10,78$ (с 30 степенями свободы).

Нормированная ошибка для $x_j \sqrt{10,78 / 15} = 0,85$.

Табулированные ранги, как и прежде, $Z_p = 3,04$ (для материала) и $Z_p = 3,20$ (для способа обработки). Отсюда $R_{3,30} = 3,04 \cdot 0,85 = 2,584$ и $R_{5,30} = 3,20 \cdot 0,85 = 2,72$.

Проверка разности средних значений, соответствующих способам обработки:

$$A - B = 8 - (-7,33) = 15,33; > 2,72;$$

$$A - C = 8 - (-4) = 12; > 2,72;$$

$$A - D = 8 - (-2) = 10; > 2,72;$$

$$A - E = 8 - 5,67 = 2,33; < 2,72;$$

$$A - B = 5,67 - (-7,33) = 13; > 2,72;$$

$$E - C = 5,67 - (-4) = 9,67; > 2,72;$$

$$E - D = 5,67 - (-2) = 7,67; > 2,72;$$

$$D - B = -2 - (-7,33) = 5,33; > 2,72;$$

$$D - C = -2 - (-4) = 2; < 2,72;$$

$$C - B = -4 - (-7,33) = 3,33; > 2,72.$$

Таким образом, лишь между способами обработки A, E, D и C нет существенной разницы во влиянии на предел прочности при изгибе, между остальными существует различие.

Из табл. 5 видно, что лазерная обработка без последующего отжига (варианты B и D) значительно снижает предел прочности на изгиб для всех трех материалов, но особенно сильно – для нитрида кремния. Это объясняется как ростом параметров тонкой структуры после лазерной обработки, так и увеличением размеров блоков и снижением плотности дислокации. При лазерной обработке в поверхностном слое происходит дробление зерен материала и возникает развитая сеть микротрещин в зоне

обработки [1]. В связи с этим после обоих видов лазерной обработки (свободная генерация и модульная добротность) необходимо провести высокотемпературный отжиг, что позволяет восстановить прочность и твердость керамики до уровня горячепрессованной, не обработанной лазером керамики.

Следовательно, и с точки зрения получения максимальной прочности $\sigma_{изг} = 440$ МПа необходимо применять керамику из сиалона, обработанную лазером с модульной добротностью с последующим высокотемпературным отжигом (способ *Е*).

Трещиностойкость материала до и после лазерной обработки оценивали по изменению критического коэффициента интенсивности напряжения K_{Ic} . Результаты измерения K_{Ic} приведены в табл. 6.

Таблица 6

Коэффициент вязкости разрушения K_{Ic} , МПа·м^{0,5}

Вид материала	Способ обработки		
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
Тисингт	3,9	3,3	4,2
	4,1	3,1	4,4
	4,3	2,9	4,6
Сиалон	6,0	5,5	6,2
	6,2	5,7	6,4
	6,4	5,9	6,6
Нитрид кремния	4,2	3,0	4,0
	4,0	3,2	4,2
	3,8	3,4	4,4

Результаты обработки приведены в табл. 7.

Таблица 7

Результаты дисперсионного анализа для K_{Ic}

Источник изменчивости	Число степеней свободы	Сумма квадратов	Среднеквадратичное отклонение
Вид материала <i>G</i>	2	30,85	15,425
Способ обработки <i>P</i>	2	4,93	2,465
Способ взаимодействия <i>PG</i>	4	0,31	0,0775
Ошибка или изменения внутри ячейки	18	0,72	0,04
Сумма	26	36,81	

Влияние материала и способа обработки оценивали по критерию *F*.

$$F_{2,18} = \frac{15,425}{0,04} = 385,625 > F_{кр} = 6,01 \quad (\alpha = 0,01);$$

$$F_{2,18} = \frac{2,465}{0,04} = 61,625 > F_{кр} = 6,01 \quad (\alpha = 0,01);$$

$$F_{4,18} = \frac{0,0775}{0,04} = 1,9375 < F_{кр} = 4,58 \quad (\alpha = 0,01).$$

Таким образом, влияние материала G на K_{1c} является определяющим, влияние способа обработки тоже весьма существенно, а взаимодействие незначимо. Последний вывод можно объяснить тем, что K_{1c} изменяется для трех способов обработки приблизительно одинаково для каждого материала.

На рис. 3 построены кривые по данным табл. 6. Значительный интервал между кривыми 2 и 1, 3, соответствующими силону, тисиниту и нитриду кремния, иллюстрирует влияние этого фактора. Общий вид кривой, проходящей над тремя точками, соответствующими способам обработки (до, лазерная, то же + отжиг), отражает влияние способа обработки на K_{1c} , а то, что три кривые почти параллельны (эквидистантны), свидетельствует об отсутствии взаимодействия между этими факторами.

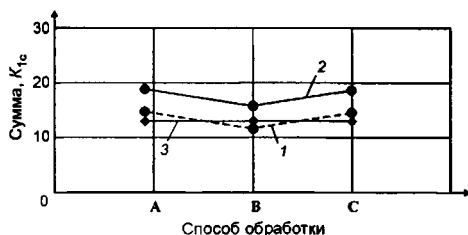


Рис. 3. Диаграмма влияния материала и способа обработки на K_{1c} :

1 – тисинит; 2 – силон; 3 – нитрид кремния

Очевидно, что силон обладает более высоким K_{1c} , а K_{1c} тисинита и нитрида кремния практически одинаков, но значительно меньше, чем силона.

Для сравнения трех способов обработки воспользуемся снова критерием Дункана для средних значений K_{1c} , соответствующих разным способам обработки:

Способ обработки	A	B	C
x_j	42,9/4,77	36/4	45/5

Используем метод, изложенный ранее:

Способ обработки	B	A	C
Средние значения	4	4,77	5

Средний квадрат ошибки $x_j = 0,04$ (с 18 степенями свободы).

Нормированная ошибка для x равна $\sqrt{0,04/9} = 0,067$.

Табулированные ранги Z_p с 18 степенями свободы (0,05) имеют значения: $Z_{3,18} = 3,12$; $R_{3,18} = 3,12 \cdot 0,067 = 0,208$.

Проверка разностей средних, соответствующих способам обработки:

$$\begin{aligned} C - B &= 5 - 4 = 1 > 0,208; \\ C - A &= 5 - 4,77 = 0,23 > 0,208; \\ A - B &= 4,77 - 4 = 0,77 > 0,208. \end{aligned}$$

Таким образом, обработка C (лазерная + отжиг) с 5%-ным уровнем значимости отличается от B и C так же, как и A от B . Поэтому можно утверждать, что обработка C лучше других. Следовательно, наилучшей комбинацией вида материала и способа обработки, дающей максимальное значение $K_{1c} \approx 6,4 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$, будет сочетание силлона с лазерной обработкой и последующим отжигом.

Уменьшение значений K_{1c} после лазерной обработки объясняется изменением условий зарождения острой трещины, в частности дроблением зерен. При высокотемпературном отжиге устраняется хрупкий дефектный слой, при этом значение K_{1c} увеличивается до значений горячепрессованной керамики и выше.

Обобщая полученные результаты, можно утверждать, что сочетание силлона с лазерной обработкой с последующим отжигом обеспечивает максимальное значение микротвердости, предела прочности на изгиб и коэффициента вязкости разрушения K_{1c} .

Представляет интерес определение связи между исследуемыми параметрами керамики — микротвердостью, пределом прочности на изгиб и коэффициентом вязкости K_{1c} . По формуле

$$r_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta y_i \Delta y_j}{\sqrt{\sum \Delta y_i^2 \sum y_j^2}}, \quad (7)$$

где r_{ij} — коэффициент парной корреляции; Δy_i и Δy_j — разности текущих и средних значений параметров оптимизации, т. е. $(y_i - \bar{y}_i)$ и $(y_j - \bar{y}_j)$; n — число наблюдений, определяли $r_{1,2}$, $r_{1,3}$ и $r_{2,3}$.

Используя данные табл. 3, 5 и 6, рассчитали указанные коэффициенты парной корреляции: $r_{1,2} = 0,93$; $r_{1,3} = 0,83$ и $r_{2,3} = 0,93$. Их значения больше табличного $r_{кр} = 0,7977$ (при $\alpha = 0,01$ и $f = n - 2 = 7$).

Следовательно, связь между показателями твердости, предела прочности при изгибе и K_{1c} можно представить в виде линейных уравнений:

$$y_2 = \sigma_{изг} = 37 + 28,66y_1 = 37 + 28,66H_{\mu}; \quad (8)$$

$$y_3 = K_{1c} = 0,427y_1 - 0,91 = 0,427H_{\mu} - 0,91; \quad (9)$$

$$y_3 = K_{1c} = 0,0157y_2 - 1,774 = 0,0157\sigma_{изг} - 1,774 \quad (10)$$

($\sigma_{изг}$, МПа; H_{μ} , ГПа и K_{1c} , МПа·м^{-0,5}).

Следовательно, зная, например, значение H_{μ} (ГПа), можно рассчитать $\sigma_{изг}$ или K_{1c} ; ошибка не превышает 6%.

Таким образом, использование силановой керамики, обработанной лазером в режиме модулированной добротности с последующим высокотемпературным отжигом в среде азота, позволяет получить достаточно высокие значения твердости, предела прочности на изгиб и коэффициента вязкости разрушения ($H_{\mu} = 13,5$ ГПа, $\sigma_{изг} = 440$ МПа и $K_{1c} = 6,4$ МПа·м^{-0,5}).

ЛИТЕРАТУРА

1. Коваленко И. С., Лавринович А. В. Лазерная обработка керамических материалов. – Киев: Техника, 1991. – 118 с.
2. Хикс Ч. Основные принципы эксперимента. – М.: Мир, 1967. – 407 с.

УДК 669.019.02.09

Г. И. КЛЕЩЕНАК, канд. техн. наук,
В. А. СТЕФАНОВИЧ, канд. техн. наук,
В. Е. ЛИВЕНЦЕВ, О. Г. КЛЕЩЕНАК (БНТУ)

ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННАЯ СТАЛЬ ДЛЯ РАБОЧЕГО СЛОЯ ШТАМПОВ ГОРЯЧЕГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ, ВОССТАНОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ОБОГРЕВА

В настоящее время для изготовления штампов горячего деформирования используется сталь 5ХНМ, которая не обеспечивает их высокую эксплуатационную стойкость. В НИЛ «Материаловедение и литейное производство» БНТУ для рабочего слоя восстанавливаемых методом электрошлакового обжига (ЭШО) штампов разработана специальная экономнолегированная сталь, повышающая эксплуатационную стойкость штамповой оснастки в 1,3 – 1,5 раза.

Выбор легирующего комплекса при создании новых сталей со специальными свойствами проводился на основе анализа патентных и научных материалов по характеру влияния легирующих элементов на структуру и свойства экономнолегированных штамповых сталей повышенной прочности и вязкости. Наиболее перспективным оказался комплекс следующего состава, % (по массе): 1,5 – 2,0 хрома; 1,5 – 2,0 никеля; 0,2 – 0,5 молибдена; 0,2 – 0,4 ванадия; 0,4 – 0,5 углерода. По сравнению с базовой сталью 5ХНМ увеличение содержания хрома в новой стали обеспечивает повышенную прокаливаемость и окалиностойкость рабочего слоя восстанов-